

< 論 文 >

직각 밀폐용기내의 복합부력에 의한 자연대류에 관한 실험적 연구

이 진 호* · 현 명 태**

(1986년 1월 24일 접수)

Experimental Study of Natural Convection Due to Combined Buoyancy in a Rectangular Enclosure

Jinho Lee and Myung Taek Hyun

Key Words: Natural Convection(자연대류), Combined Buoyancy(복합부력), Rectangular Enclosure(직각밀폐용기), Buoyancy Ratio(부력비), Cellular Flow Motion(셀 형태의 유동), Mass Boundary Layer Flow(물질경계층 흐름)

Abstract

An experimental investigation was conducted to study natural convection due to temperature and concentration differences between the two opposite end walls of a rectangular enclosure of aspect ratio 0.2.

Flow motion in the enclosure appears as a uni-cell flow pattern for the relatively lower concentration and higher temperature differences and vice versa, while it appears as a multi-cell flow pattern for the comparable temperature and concentration differences.

In the multi-cell flow regime, when the cellular flow motion is very slow, vertical temperature differences within the cells are negligible while the vertical concentration differences are large. In addition, both the temperature and concentration differences are negligible across the interface between the slowly moving cells.

For the fast moving cellular flow motion, on the contrary, vertical temperature differences within the cells are large while the vertical concentration differences are negligible. In this case, temperature differences are negligible and the concentration differences are large across the interface between the fast moving cells.

기 호 설 명

C_1 : 밀폐용기 왼쪽벽에서의 농도

C_2 : 밀폐용기 오른쪽벽에서의 농도

ΔC : 양단에서의 농도차 ($=C_1 - C_2$)

D : 소금의 확산률

g : 중력가속도

* 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 연세대학교 대학원

- H : 밀폐용기의 높이
- L : 밀폐용기의 길이
- l : 셀의 평균 두께
- Le : Lewis 수($=\alpha/D$)
- N : 부력비 ($=\bar{\beta}\Delta C/\beta\Delta T$)
- Ra_s : 농도차에 의한 Rayleigh 수($=g\bar{\beta}\Delta CH^3/\nu\alpha$)
- Ra_T : 온도차에 의한 Rayleigh 수($=g\beta\Delta TH^3/\nu\alpha$)
- T_1 : 밀폐용기 왼쪽벽에서의 온도
- T_2 : 밀폐용기 오른쪽벽에서의 온도
- ΔT : 양단에서의 온도차($=T_1-T_2$)
- x : 수평방향 좌표
- y : 수직방향 좌표

희랍문자

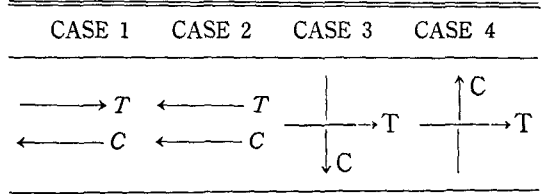
- α : 열확산률
- β : 온도차에 의한 체적팽창계수
- $\bar{\beta}$: 농도차에 의한 체적팽창계수
- δ_s : 물질경계층 두께
- δ_T : 열경계층 두께
- ν : 동점성 계수

1. 서 론

자연대류는 중력장과 같은 body force 장 내에서 유체내의 밀도차로 유발되며 유체내의 밀도차는 주로 온도 및(혹은) 농도의 차이에 의해 생긴다. 온도와 농도의 차이가 함께 작용하여 일어나는 부력을 복합부력이라 하며 복합부력에 의한 자연대류를 thermosolutal convection 또는 double-diffusive convection 이라 한다.⁽¹⁾ 복합부력에 의한 자연대류는 세척작용, 건조과정, 재료가공, 지구물리학 및 해양학 등에 관련되어 지금까지 많은 연구와 관심의 대상이 되어 왔으며 특히 최근 첨단과학의 발달로 보다 양질의 결정체가 요구됨에 따라 결정성장과 관련된 전달현상을 연구하는 모델로서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

온도와 농도구배가 동시에 작용하는 자연대류는 그 중 하나만이 유체의 운동력(부력)으로 작용하는 경우보다 훨씬 복잡하며 그 해석도 매우 어렵다. 복합부력에 의한 자연대류에서 밀도구배가 중력의 방향과 수직으로 작용하는 경우(conventional mode) 온도와 농도구배의 방향에 따라 Table 1 과 같이 4 가지 유형으로 나눌 수 있다.⁽²⁾(여기서 T 와 C 는 각각 온도와 농도를 나타내며 화살표는 그 값이 증가하는 방향을 표시한다.)

Table 1 Conventional convection mode with combined buoyancy



CASE 1에서는 온도구배에 의한 부력과 농도구배에 의한 부력이 같은 방향으로 작용하기 때문에 대류는 더 활발히 일어나나 CASE 2에서는 각각의 부력이 서로 반대방향으로 작용하므로 유동이 둔화된다. CASE 3에서는 농도구배가 수직방향으로 안정되게 분포되어 있기 때문에 온도구배에 의한 흐름이 약화되나 CASE 4에서는 농도가 불안정하게 분포되어 온도구배에 의한 유동은 쉽게 일어난다.

Conventional mode에 대한 지금까지의 연구는 수직방향으로 성층화된 소금물에 수평방향으로 온도차를 가해주었을 때(CASE 3)에 국한되어 왔다. Thorpe 등⁽³⁾은 틸이 좁은 두 수직평판내에서의 유동에 관한 실험에서 여러 개의 층을 이룬 셀 형태의 유동을 관찰할 수 있었다. Wirtz 등⁽⁴⁾은 셀들 사이의 인접면을 통해 열과 소금이 수직방향으로 확산되는 양을 측정하였으며 Hart⁽⁵⁾와 Chen⁽⁶⁾은 수치해석으로 셀이 형성되기 시작하는 임계온도차에 대해 이론적인 해석을 하였다. 또한 Chen 등⁽⁷⁾은 완전히 밀폐된 용기내에서 나타난 셀 형태의 유동은 시간이 경과함에 따라 밀폐용기의 위·아랫면에서 인접한 셀끼리 합쳐지면서 전체적으로 셀의 갯수가 감소함을 관찰하였고 Wirtz 등⁽⁸⁾은 이러한 셀이 셀의 두께를 대표길이로 할 때 Rayleigh 수가 1.75×10^4 보다 큰 경우에 생김을 밝혔다.

최근 Wang 등⁽⁹⁾은 전기분해법을 이용하여 CASE 1, 2에 대한 실험을 처음 행하였는데 실험결과 CASE에 관계없이 항상 3개의 층을 이룬 셀과 농도차만에 의해 일정한 방향으로 흐르는 물질경계층 흐름이 관찰되었다. 그들의 실험은 비록 정성적이었지만 CASE 1, 2에 대한 이해를 얻는 최초의 실험으로 그 의의가 크다.

본 연구에서는 중형비가 0.2인 직각 밀폐용기내에서 소금물을 시험유체로 하여 양단의 온도와 농도차가 수평방향으로 가해지는 경우(CASE 1, 2) 밀폐용기내에서의 유동현상과 열전달 특성을 온도와 농도분포, 흐름의 가시화를 통해 실험적으로 관찰, 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 직각 밀폐용기와 소금물과 물을 공급하는 2개의 보조용기로 나누어지며 밀폐용기와 보조용기 사이에 삼투막을 설치하였다. 실험에 사용된 직각 밀폐용기는 길이 150mm, 높이 30mm, 깊이를 170mm로 하여 중횡비를 0.2로 하였으며 모든 실험용기는 두께 10mm의 아크릴판을 사용해 제작하였다. 2개의 항온조를 사용하여 필요한 온도와 농도의 소금물과 순수한 물을 각 보조용기에 공급하여 수평방향으로 온도 및 농도구배를 동시에 가해주는 한편 밀폐용기에는 이들 농도차의 1/2에 해당하는 농도의 소금물을 넣어줌으로써 삼투막을 통해 밀폐용기로 유출입되는 물의 양을 같게 하였다. 보조용기는 항온조에서 물과 소금물이 공급될 때 밀폐용기내의 흐름에 영향을 주지 않도록 윗수조를

크게 만들어 공급된 용액이 저장된 후 삼투막쪽으로 흐르도록 하였으며 유출될 때의 영향도 고려해 아래수조를 크게 만들었다. 보조용기에 유출입되는 용액의 유량은 밸브로 조절했고 밀폐용기와 보조용기 사이의 누수를 방지하기 위하여 각 용기 사이에 얇은 개스킷을 대고 볼트로 체결하였으며 실험장치에서의 열손실을 막기 위하여 두께 30mm인 스티로폼로 단열시켰다.

온도측정을 위한 열전대는 copper-constantan을 사용하였는데 밀폐용기 뒷판에 일정한 간격으로 직경 1.5mm인 5개의 구멍을 뚫어 온도측정 probe를 넣어 깊이를 변화시킴으로써 밀폐용기내의 온도변화를 조사하였고 삼투막에 용액이 유출입되는 곳에도 각각 1개씩의 열전대를 설치하여 실험조건에 맞는 온도가 유지되는가를 조사하였다. 농도를 측정하기 위해서는 밀폐용기 뒷판에 열전대와 같은 위치에서 수직방향으로 5mm 간격으로 직경 1mm인 구멍을 뚫은 뒤 실리콘 접착제로 봉하여 필요시 소금물을 추출할 수 있게 하였다.

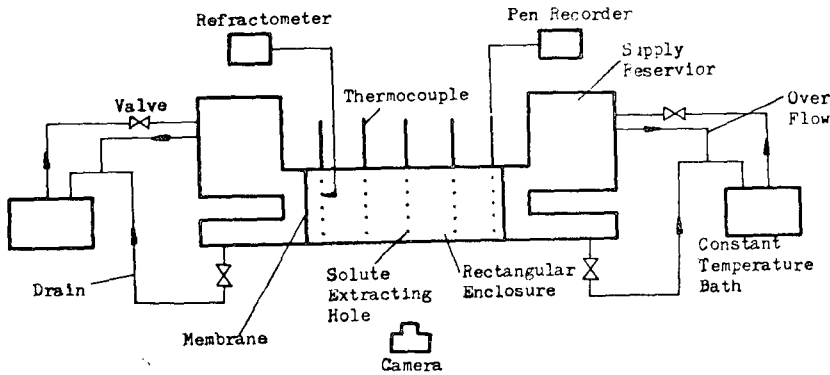


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

2.2 온도 및 농도측정

실험은 일정온도와 농도로 유지된 소금물 및 순수한 물을 밀폐용기 양단에 계속 공급하여 처음부터 온도와 농도구배를 동시에 가해 주었다. 일정한 시간 간격으로 밀폐용기내의 온도 및 농도분포를 측정할 결과 본 실험영역에서 10~12시간 후면 정상상태에 도달하였다.

밀폐용기내의 온도는 $x/L=1/10, 3/10, 5/10, 7/10, 9/10$ 인 위치에 바깥지름 1mm인 5개의 가는 스테인레스판에 열전대를 삽입하여 밀폐용기의 위·아랫면과 중앙부에서의 수평방향 온도분포 및 각 위치에서의 수

직방향 온도분포를 2mm 간격으로 측정하였다.

농도는 $x/L=1/10, 3/10, 5/10, 7/10, 9/10$ 인 위치에서 밀폐용기 위·아랫면과 수직방향으로 5mm 간격으로 뚫은 각 측정부위에서 바깥지름 0.5mm인 주사바늘을 이용해 극히 미소량의 소금물을 추출하여 이를 ATAGO ABBE Refractometer 농도측정기로 몇 차례 측정하여 각 위치에서의 평균농도를 $\pm 5\%$ 이내에서 조사하였다.

2.3 유동의 가시화

밀폐용기내의 유동현상을 가시화하기 위해 밀폐용기

내의 소금물과 같은 농도의 소금물에 붉은 물감을 섞은 다이(dye)를 주사기로 밀폐용기내에 주입하여 카메라 및 비디오 카메라로 촬영하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험은 중횡비가 0.2인 직각 밀폐용기내에서 소금물을 시험유체로 하여 $Ra_T=1.92 \times 10^6 \sim 3.19 \times 10^7$ 및 $Ra_S=6.28 \times 10^7 \sim 2.75 \times 10^8$ 인 범위내에서 행하였으며 실험결과 중 대표적인 것을 Fig. 2~7에 $x/L=1/10, 5/10, 9/10$ 에서의 수직방향 온도, 농도분포 및 유동형태를 나타내었다. 흐름의 가시화를 통하여 관찰된 복합부력에 의한 CASE 1, 2에 대한 유동형태는 CASE에 관계없이 고농도벽에서 저농도벽으로 밀폐용기의 각 벽면 및 상·하 수평경계면을 따라 얇은 층으로 흐르는 물질경계층 흐름과 물질경계층 밖의 셀 형태의 유동으로 관찰되었다. 밀폐용기내의 물질경계층 흐름의 존재는 Fig. 2~7의 수직방향 농도분포에서 살펴볼 때 밀폐용기의 위·아랫면에서의 농도변화가 크게 나타나고 있는 사실에서도 알 수 있다. 물질경계층 두께와 열경계층 두께는 $\frac{\delta_T}{\delta_S} = \left(Le \cdot \frac{\beta \Delta C}{\beta \Delta T} \right)^{1/4}$ 로 나타낼 수 있어서⁽⁹⁾ 본 실험 범위내에서 열경계층이 물질경계층보다 4.04~9.2배 두꺼움을 알 수 있다.

셀 형태의 유동은 온도와 농도차의 상관관계에 따라

단일셀 형태의 유동에서 여러개의 셀 형태의 유동으로 나타났으며 일반적으로 온도차가 증가하면 유동은 활발하였으나 농도차가 증가하면 둔화되었고 그에 따라 밀폐용기내의 온도 및 농도분포도 많은 변화를 보였다 따라서 CASE 1, 2에 대한 셀 형태의 유동은 Wang 등⁽⁹⁾의 분석처럼 물질경계층으로부터 용액의 유출에 따르는 밀도변화로 생긴다기 보다는 시간이 경과하면서 물질경계층밖에서 성층화되는 소금물과 수평방향으로의 온도구배에 의해 CASE 3에서와 비슷하게 유발된다. 물질경계층 밖에서 성층화된 고농도의 소금물이 고온벽 근처에서 온도차로 부력을 얻어 수직방향으로 상승하다가 밀도분포가 같아지는 곳에서 더 이상 상승하지 못하고 저온벽쪽으로 흐르게 되고 저온벽 근처에서는 이와 반대로 저농도의 소금물이 무거워져 저온벽을 따라 내려오다가 밀도가 같아지는 곳에서 고온벽쪽으로 흐르게 되면서 전체적으로 하나의 셀이 형성된다. 즉 셀 형태의 유동은 양단에서 온도차로 발생한 부력과 물질경계층밖에서 안정되게 성층화된 소금물의 밀도분포로 인한 성층력(stratified force)의 상관관계에 의해 형성된다. 이때 저온벽쪽으로 진행되는 소금물은 주변의 잔유체와 접하게 되면서 온도가 낮아지므로 밀도가 커져 조금씩 아래로 경사지면서 흐르게 되고, 고온벽쪽으로 흐르는 소금물은 고온벽으로 갈수록 온도가 높은 주변유체 때문에 밀도가 점점 작아져 조금씩

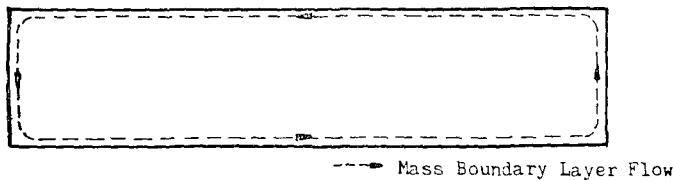
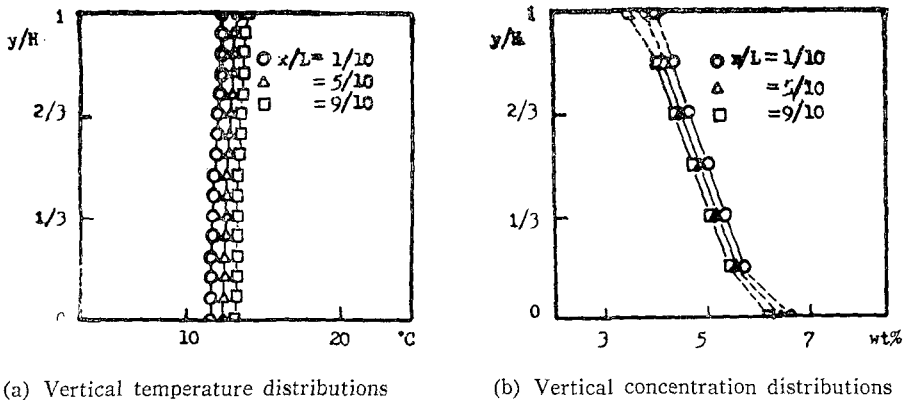
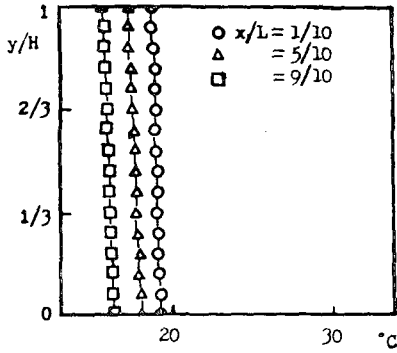
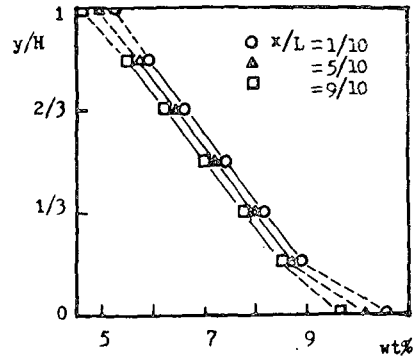


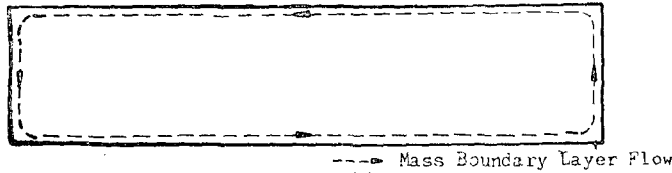
Fig. 2 Temperature and concentration distributions in an enclosure (CASE 1) $Ra_T=1.92 \times 10^6, Ra_S=1.23 \times 10^8$



(a) Vertical temperature distributions



(b) Vertical concentration distributions



(c) Flow pattern

Fig. 3 Temperature and concentration distributions in an enclosure (CASE 2)
 $Ra_r=3.50 \times 10^6$, $Ra_s=1.72 \times 10^8$

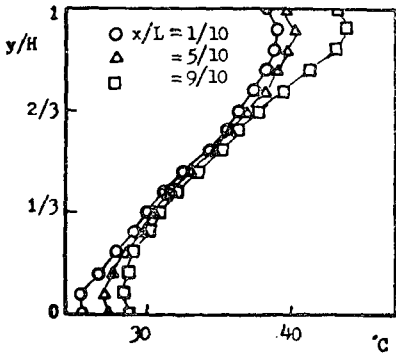
위로 경사지면서 흐른다.

양단의 온도차가 농도차에 비해 작은 경우 용기내의 유동은 농도차에 의한 느린 물질경계층 흐름만이 관찰되고 그 영역밖에서는 고농도벽에서 저농도벽으로의 미미한 확산현상이 관찰되었다. 이 경우 Fig. 2($\Delta T=4^\circ C$, $\Delta C=10wt\%$) 및 3 ($\Delta T=7^\circ C$, $\Delta C=15wt\%$)에서 살펴보면 수직방향으로의 온도변화가 아주 적음을 알 수 있다. 또한 밀폐용기내에는 물질경계층 흐름만이 존재하기 때문에 CASE 2인 Fig. 3에서는 다른 경우와는 달리 밀폐용기의 아랫면에서의 온도가 높고 윗면으로 갈수록 낮게 분포하게 된다. 농도의 경우 CASE에 관계없이 수직방향으로 안정되게 성층화되고 있으며 저농도벽으로 갈수록 농도가 낮아져 고농도벽에서 저농도벽으로 확산현상이 생기고 있음을 알 수 있다.

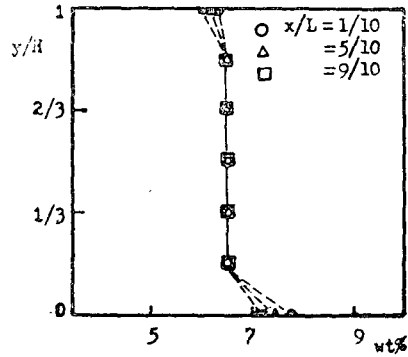
밀폐용기의 양단에서의 온도차가 농도차에 비해 크면 온도차에 의한 부력이 증가하여 용기내에는 온도차에 의한 유동속도가 빠른 단일셀이 나타난다. Fig. 4 ($\Delta T=32.4^\circ C$, $\Delta C=15wt\%$)와 5 ($\Delta T=37.8^\circ C$, $\Delta C=5wt\%$)에서 보면 밀폐용기내에서의 온도는 온도차만에 의한 경계층흐름이 나타날 때와 거의 유사하게 분포된

다. 즉 수직방향 온도분포를 살펴보면 수평방향 온도변화가 거의 상하수평면 인접부근(수평열경계층)에서 나타나고 그밖의 영역에서는 수직방향으로 안정되게 성층화되고 있다. 또한 농도는 물질경계층내를 제외하고는 밀폐용기 전역에서 균일하게 분포된다.

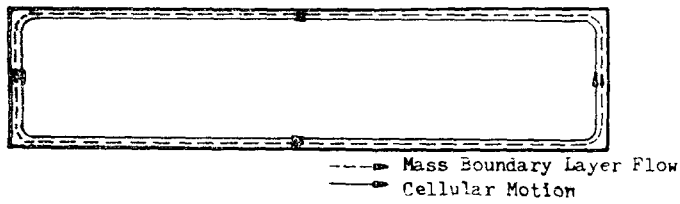
Fig. 6 ($\Delta T=23.3^\circ C$, $\Delta C=10wt\%$, 2개의 셀) 및 7 ($\Delta T=28^\circ C$, $\Delta C=15wt\%$, 4개의 셀)에서와 같이 복합부력에 의한 흐름이 몇 개의 셀로 나타나는 경우 각 셀의 유동속도는 달랐으며 각 셀 내부에서의 온도 및 농도 분포는 온도와 농도차에 의한 단일셀의 경우와 유사한 경향을 보였다. 유동이 느린 셀의 경우 셀 내의 수직방향 온도분포는 거의 변화가 없고 수직방향 농도분포는 선형적으로 안정되게 성층화되며 유동이 빠른 셀의 경우 수직방향 온도분포는 셀의 윗면과 아랫면 사이에서 그 차이가 크며 농도는 셀 내부에 균일하게 분포된다. 셀 사이의 인접면에서의 온도 및 농도분포는 셀의 유동속에 따라 달라진다. 온도의 경우는 유동속도에 관계없이 인접면에서의 변화가 적다. 그러나 농도의 경우 셀의 유동속도가 느리면 인접면에서의 변화가 거의 없지만 빠른 셀끼리 인접한 경우에는 인접면에서



(a) Vertical temperature distributions

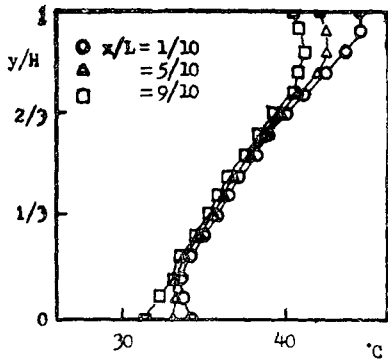


(b) Vertical concentration distributions

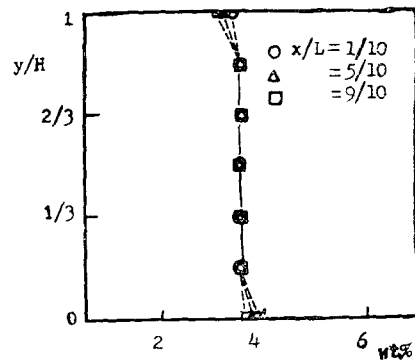


(c) Flow pattern

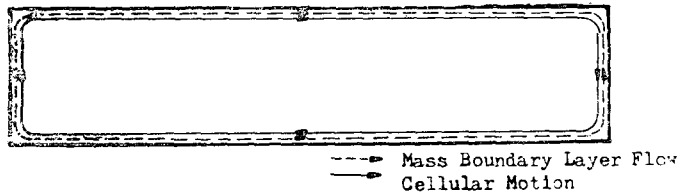
Fig. 4 Temperature and concentration distributions in an enclosure (CASE 1)
 $Ra_r = 2.65 \times 10^7$, $Ra_s = 2.17 \times 10^8$



(a) Vertical temperature distributions

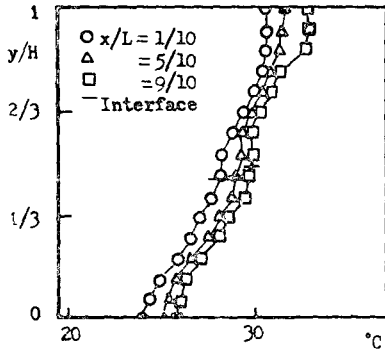


(b) Vertical concentration distributions

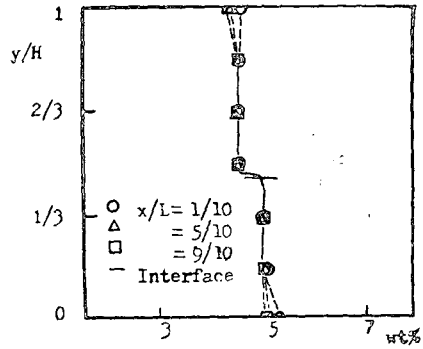


(c) Flow pattern

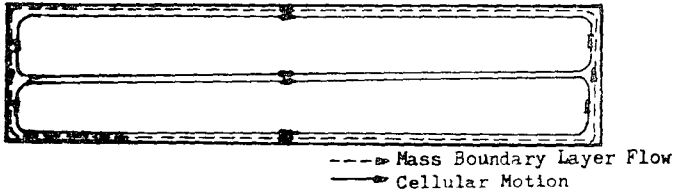
Fig. 5 Temperature and concentration distributions in an enclosure (CASE 2)
 $Ra_r = 3.02 \times 10^7$, $Ra_s = 8.05 \times 10^7$



(a) Vertical temperature distributions

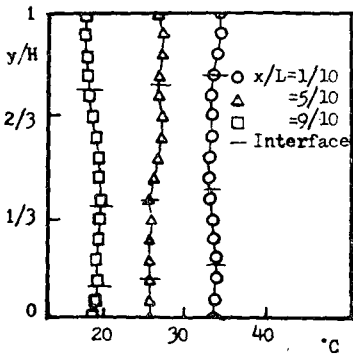


(b) Vertical concentration distributions

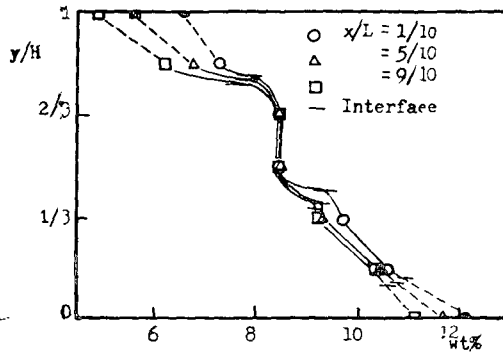


(c) Flow pattern

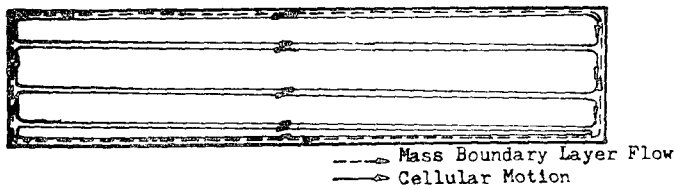
Fig. 6 Temperature and concentration distributions in an enclosure (CASE 1)
 $Ra_T=1.59 \times 10^7$, $Ra_S=1.42 \times 10^8$



(a) Vertical temperature distributions



(b) Vertical concentration distributions



(c) Flow pattern

Fig. 7 Temperature and concentration distributions in an enclosure (CASE 2)
 $Ra_T=1.85 \times 10^7$, $Ra_S=1.96 \times 10^8$

그 분포가 크게 변하고 있다. 이런 현상은 확산물의 차이($Le \approx 100$) 때문으로 유동이 빠른 셀이 인접한 경우 확산물이 큰 열은 인접면에서 확산이 충분히 이루어지지만 소금은 두 셀 사이에서 충분히 확산되지 못하여 인접면에서 농도가 크게 변하게 된다.

본 실험범위에서 Ra_T 와 Ra_S 의 상관관계에 따른 유동 형태를 Fig. 8 및 9에 나타내었다. Ra_S 에 비해 Ra_T 가 클수록 온도차만에 의한 단일셀이, 작을수록 농도차만에 의한 단일셀이 그 중간 영역에서는 여러 개의 셀이 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 온도와 농도차에 의한 부력이 같은 방향으로 작용하는 CASE 1의 경우보다 반대방향으로 작용하는 CASE 2의 경우 유동 형태의 구분선이 낮아 같은 농도차일 경우 온도나 농도차만에 의한 단일셀 형태의 유동은 CASE 1의 경우보다 높은 온도차에서 관찰된다.

밀폐용기내에 여러개의 셀이 형성될 때 용기의 위·아랫면에서 생기는 셀 외에는 셀의 두께가 거의 비슷하다. Fig. 10은 부력비에 따른 셀들의 평균 두께를 나타낸 것으로 부력비가 증가할수록 셀의 두께가 감소함을 알 수 있다. 즉 온도차가 작거나 농도차가 커서 부력비가 증가하게 되면 밀폐용기에는 더 많은 셀이

생성된다. 동일한 부력비에서는 CASE 1일 때 보다 CASE 2일 때 셀의 두께가 작아 같은 실험 조건하에서는 CASE 2일 때 더 많은 셀들이 형성됨을 알 수 있다. CASE 1일 때는 온도와 농도차에 의한 부력이 같은 방향으로 작용하여 부력이 증가하게 되지만 CASE 2일 때는 각 부력이 반대방향으로 작용하여 서로 상쇄되므로 운동력이 작아지기 때문이다.

4. 결 론

중형비가 0.2인 직각 밀폐용기내에서 소금물을 시험유체로 하여 수평방향으로의 온도 및 농도구배에 의한 밀폐용기내의 유동현상과 온도 및 농도분포를 관찰, 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합부력에 의한 자연대류의 경우 농도차만에 의한 물질경계층 흐름이 밀폐용기의 각 벽을 따라 얇게 형성된다. 용기내의 체적 유동은 셀 형태의 유동으로 나타나며 온도차가 농도차에 비해 상당히 크면 온도차만에 의한 단일셀이 그 반대이면 농도차만에 의한 단일셀이 생성되고 그 중간영역에서는 여러 개

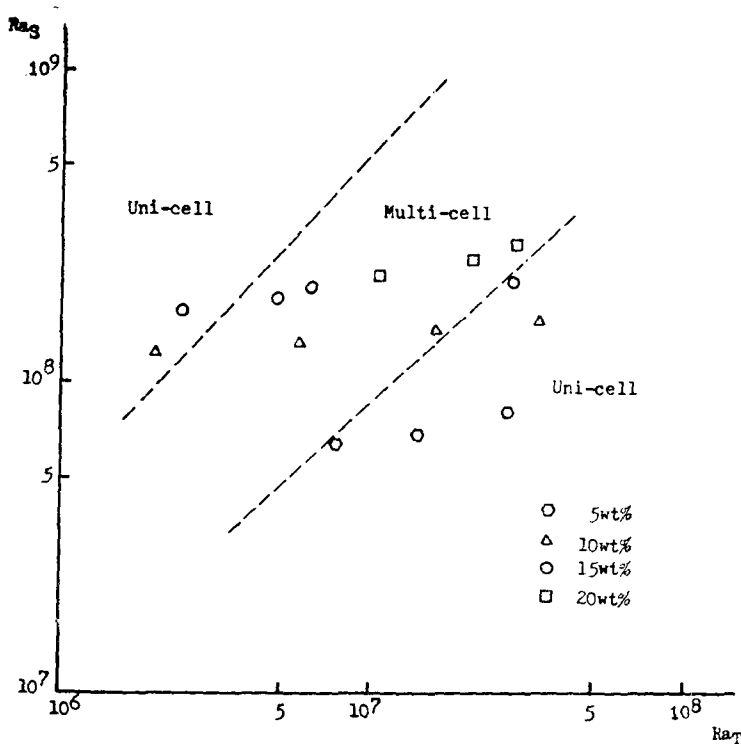


Fig. 8 Cellular flow pattern depending on thermal and solutal Rayleigh number (CASE 1)

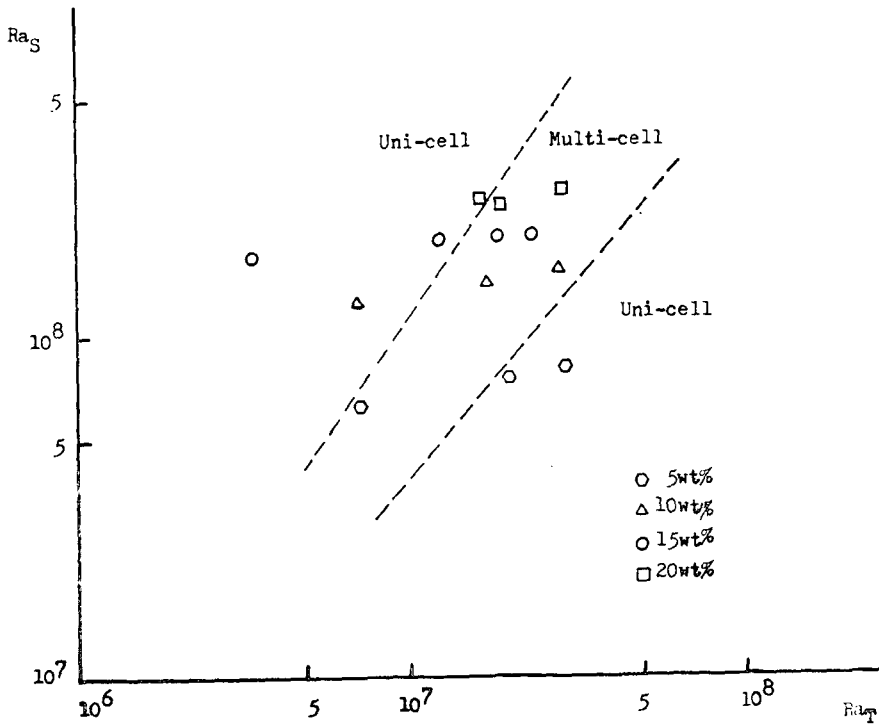


Fig. 9 Cellular flow pattern depending on thermal and solutal Rayleigh number (CASE 2)

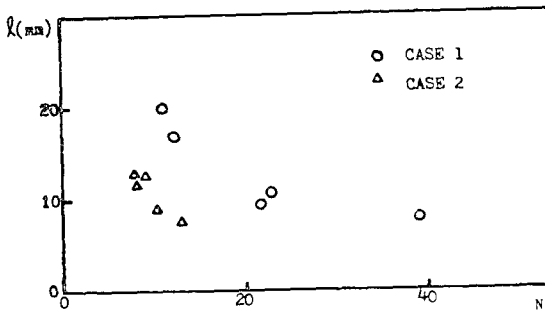


Fig. 10 Mean cell thickness vs. buoyancy ratio

의 셀이 생성된다.

- (2) 온도차만에 의한 단일셀 형태의 유동에서 온도분포는 온도차만에 의한 자연대류와 유사하게 나타나며 농도분포는 물질경계층을 제외한 밀폐용기 전역에서 일정하다. 반면 농도차만에 의한 단일셀 형태의 유동인 경우에는 수직방향 온도분포는 거의 일정하고 농도는 수직방향으로 안정되게 성층화 된다.
- (3) 유동이 여러 개의 셀로 나타나는 경우 각 셀 내부에서의 온도 및 농도는 그 셀의 유동속도가 빠르면 온도차만에 의한 단일셀과, 유동속도가 느리면 농도차만에 의한 단일셀과 유사하게 분포된다. 이때 유

동이 빠른 셀끼리 인접한 경우 인접면에서의 온도는 수직방향으로 변화가 거의 없지만 농도는 크게 변한다. 유동이 느린 셀이 인접한 경우에는 인접면에서 수직방향 온도 및 농도분포는 별다른 변화가 없다.

- (4) 셀의 두께는 부력비가 증가할수록 감소하므로 밀폐용기내의 셀 수는 온도차가 작고 농도차가 클수록 증가하게 된다. 또한 비슷한 조건하에서는 CASE 1일 때보다 CASE 2일 때 더 많은 셀이 생성된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구소의 1984년도 연구비 지원에 의해 연구된 것으로서 재단당국자에게 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) J.S. Turner, Buoyancy Effects in Fluid, Cambridge Univ. Press, pp.251~287, 1973
- (2) S. Ostrach, "Natural Convection with Combined Driving Forces", PCH Physico Chemical Hydrod-

- ynamics, Vol. 1, pp.233~247, 1980
- (3) S.A. Thorpe, P.K. Hutt and R. Soulsby, "The Effect of Horizontal Gradients on Thermohaline Convection", *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, Part 2, pp. 375~400, 1969
- (4) R.A. Wirtz and C.S. Reddy, "Heat and Mass Transport across Diffusive Interfaces Bounded by Turbulent Convecting Regions", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 19, pp.471~478, 1976
- (5) J.E. Hart, "On Sideways Diffusive Instability", *J. Fluid Mech.*, Vol. 49, Part 2, pp.279~288, 1971
- (6) C.F. Chen, "Onset of Cellular Convection in a Salinity Gradient Due to a Lateral Temperature Gradient", *J. Fluid Mech.*, Vol. 63, Part 3, pp. 563~576, 1974.
- (7) C.F. Chen, D.G. Briggs and R.A. Wirtz, "Stability of Thermal Convection in a Salinity Gradient Due to Lateral Heating", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 14, pp.57~65, 1971
- (8) R.A. Wirtz, D.G. Briggs and C.F. Chen, "Physical and Numerical Experiments on Layered Convection in a Density Stratified Fluid", *Geophys. Fluid Dynam.*, Vol. 3, pp.265~288, 1972.
- (9) L.W. Wang, Y. Kamotani and S. Ostrach, "Experimental Study of Natural Convection in a Shallow Horizontal Cavity with Different End Temperatures and Concentrations, Report FTAS/TR-82-164, Case Western University, 1982